

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**  
**EARTH SCIENCES**УДК 535.37  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-66-73>Поступило в редакцию 29.08.2022  
Received 29.08.2022**С. А. Лысенко, П. О. Зайко***Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КРАТКОСРОЧНЫХ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ  
ПОГОДЫ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МЕЗОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ WRF И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ***(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)*

**Аннотация.** Рассмотрена задача повышения точности численных прогнозов погоды для Беларуси на основе применяемой в национальной гидрометеорологической службе модели WRF за счет ассимиляции в ней данных дистанционного зондирования Земли. Показано, что для зимнего периода использование в модели спутниковых данных высокого пространственного разрешения по структуре землепользования, альbedo, листовом индексе и фотосинтетически активной радиации, поглощаемой подстилающей поверхностью, позволяет сократить среднеквадратическую погрешность краткосрочного прогноза приземной температуры воздуха (до 48 ч) на 0,53–1,11 °С. Для летнего периода на основе численных экспериментов установлен оптимальный коэффициент коррекции альbedo подстилающей поверхности, позволяющий сократить среднеквадратическую погрешность прогноза температуры на метеорологических станциях Беларуси для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч в среднем на 0,30, 0,10, 0,15 и 0,16 °С соответственно.

**Ключевые слова:** численные прогнозы погоды, мезомасштабная модель WRF, ассимиляция данных дистанционного зондирования Земли

**Для цитирования.** Лысенко, С. А. Повышение точности краткосрочных численных прогнозов погоды для территории Беларуси с использованием мезомасштабной модели WRF и данных дистанционного зондирования Земли / С. А. Лысенко, П. О. Зайко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 1. – С. 66–73. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-66-73>

**Sergey A. Lysenko, Polina O. Zaiko***Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***IMPROVING THE ACCURACY OF SHORT-TERM NUMERICAL WEATHER FORECASTS  
FOR THE TERRITORY OF BELARUS USING THE MESOSCALE WRF MODEL  
AND EARTH REMOTE SENSING DATA***(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)*

**Abstract.** The problem of improving the WRF numerical weather model performance for the territory of Belarus by assimilating the Earth remote sensing data is considered. It is shown that for the winter period, the use of satellite data of high spatial resolution, including on the structure of land use, albedo, leaf index and photosynthetically active radiation absorbed by the underlying surface can reduce a root-mean-square error of the short-term forecast (up to 48 h) of the air surface temperature by 0.53–1.11 °C. For the summer period, on the basis of numerical experiments the optimal correction factor for the land surface albedo was estimated. This made it possible to reduce a root-mean-square error of temperature forecast at the meteorological stations of Belarus for the lead time of +12, +24, +36, and +48 h by an average of 0.30 °C, 0.10 °C, 0.15 °C, and 0.16 °C, respectively.

**Keywords:** numerical weather forecasts, WRF mesoscale model, Earth remote sensing data assimilation

**For citation.** Lysenko S. A., Zaiko P. O. Improving the accuracy of short-term numerical weather forecasts for the territory of Belarus using the mesoscale WRF model and earth remote sensing data. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2023, vol. 67, no. 1, pp. 66–73 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2023-67-1-66-73>

**Введение.** В связи с быстрыми изменениями климата и возрастанием частоты опасных погодных явлений в последние годы все более высокие требования предъявляются к метеорологическим прогнозам и предупреждениям.

Критическое значение для точности численных прогнозов погоды имеет качество исходных данных о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности. Для более репрезентативного задания в метеорологических моделях начальных условий помимо стандартных станционных наблюдений в последние годы все чаще используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Вопросам повышения эффективности численных моделей прогноза погоды за счет ассимиляции в них данных ДЗЗ посвящено большое количество публикаций зарубежных авторов [1–7]. При этом, далеко не во всех работах достигается однозначно положительный эффект в части оправданности прогнозов метеорологических моделей, а результаты этих работ имеют строгую региональную привязку и не могут быть обобщены или перенесены на другие регионы. Для Беларуси задача использования данных ДЗЗ при разработке численных прогнозов погоды до настоящего времени не решалась.

В настоящей работе проведена актуализация геофизических характеристик на территории Беларуси в мезомасштабной модели WRF (The Weather Research and Forecasting), применяемой в национальной гидрометеорологической службе. С использованием современных баз данных ДЗЗ уточнено описание в модели структуры землепользования, альbedo и вегетационных характеристик подстилающей поверхности. Впервые получены оценки эффективности применения оперативных спутниковых данных для краткосрочного численного прогнозирования температуры воздуха на территории Беларуси в зимний и летний периоды.

**Актуализация для территории Беларуси мезомасштабной системы численного прогноза погоды WRF.** В качестве основного инструмента для краткосрочного прогнозирования метеорологических условий на территории Беларуси в настоящее время используется численная мезомасштабная модель атмосферных процессов WRF-ARW. Данная модель является негидростатической, интегрирующей уравнения движения на прямоугольной сетке методом конечных разностей [8]. Для описания мелкомасштабных (подсеточных) физических процессов в модели WRF используются схемы параметризации микрофизики, потоков длинноволновой и коротковолновой радиации, тепло- и влагообмена в почве, конвекции и турбулентности в планетарном пограничном слое атмосферы и др.

В качестве начальных и граничных условий во всех численных экспериментах авторами использовались прогнозы глобальной метеорологической модели GFS (Global Forecast System) с шагом сетки  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  [9]. Исходный срок моделирования состояния атмосферы – 00 UTC, заблаговременность прогноза +48 ч с выходными результатами через каждые 12 ч.

В оригинальной версии модели WRF задание характеристик подстилающей поверхности производится с помощью стандартной цифровой базы данных, включающей рельеф, классы землепользования, индекс листовой поверхности (LAI), альbedo, долю поглощаемой фотосинтетически активной радиации (FPAR), тип почвы и другие параметры. Актуализация модели WRF для территории Беларуси проводилась двумя способами. В первом способе использовалась база данных среднемесячных (медианных) характеристик подстилающей поверхности на основе временных рядов спутниковых продуктов за период с 2000 по 2020 г. Для задания пространственной структуры землепользования использовались данные Global Land Cover 2019 (GLC 2019) международной космической программы мониторинга Земли «Copernicus», а для альbedo, LAI и FPAR – база данных «The Global Land Surface Satellite» (GLASS).

Второй способ актуализации модели подстилающей поверхности основан на использовании ежедневно обновляемых (оперативных) спутниковых продуктов. Как и в первом подходе обновлению подлежали альbedo, LAI и FPAR. Однако в отличие от предыдущего варианта, использо-

вание оперативных спутниковых данных позволяет учитывать ежедневные изменения параметров подстилающей поверхности, зачастую сильно отличающиеся от их среднемесячных климатических значений. В качестве оперативных спутниковых данных для инициализации численной модели WRF авторами выбраны общедоступные данные спектрорадиометра MODIS – прибора NASA, установленного на космических аппаратах Terra и Aqua. Для заполнения пропусков в оперативных данных MODIS оперативные спутниковые продукты объединялись с медианными (климатическими) данными и на этой основе составлялись композитные пространственные распределения характеристик подстилающей поверхности, равномерно покрывающие весь исследуемый регион (рис. 1).

Сравнение оригинальной базы геофизических данных модели WRF с оперативными спутниковыми продуктами показывает их существенное различие для отдельных периодов. Так, в качестве примера на рис. 2 представлены пространственные распределения альbedo подстилающей поверхности для 1 июня 2021 г. Видно, что значения альbedo из стандартной базы данных WRF значительно ниже полученных по данным ДЗЗ. В частности, на карте композитного спутникового продукта альbedo отчетливо выделяются пахотные земли с достаточно высоким альbedo, которые практически не просматриваются на карте альbedo из стандартной базы данных WRF.

Для оценки влияния исходных данных на качество численного прогноза погоды проведен ряд численных экспериментов, включающих моделирование погодных условий для территории Беларуси при различных способах задания характеристик подстилающей поверхности:

без изменений базовых геофизических параметров модели WRF;

с использованием структуры землепользования из базы данных GLC 2019 и среднемесячных значений альbedo, LAI и FPAR, рассчитанных для периода 2000–2020 гг. на основе архива спутниковых данных GLASS;

с использованием оперативных спутниковых продуктов MODIS при сохранении в модели структуры землепользования, соответствующей данным GLC 2019.

**Статистические оценки качества численных прогнозов приземной температуры.** Оценки точности численных прогнозов погоды проводились в соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации (ВМО) на основе фактических, трехчасовых наблюдений на метеорологических станциях Беларуси.

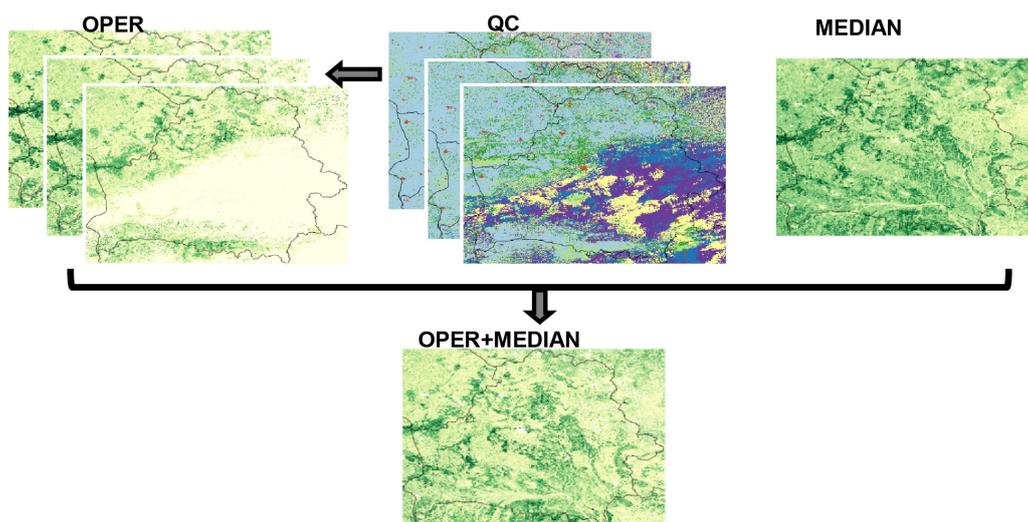


Рис. 1. Схема формирования оперативного композитного спутникового продукта LAI (листового индекса): OPER – оперативные спутниковые карты LAI за ближайший ко времени прогноза период; QC – индикаторы качества оперативных спутниковых продуктов; MEDIAN – среднемесячное (медианное) пространственное распределение LAI; OPER + MEDIAN – композитный оперативный продукт LAI

Fig. 1. Scheme for constructing an operational composite satellite product LAI (Leaf Area Index): OPER is LAI operational satellite maps for the nearest to forecast time period; QC is indicators of the quality of operational satellite products; MEDIAN is average monthly (median) spatial distribution of LAI; OPER + MEDIAN – composite operational LAI product

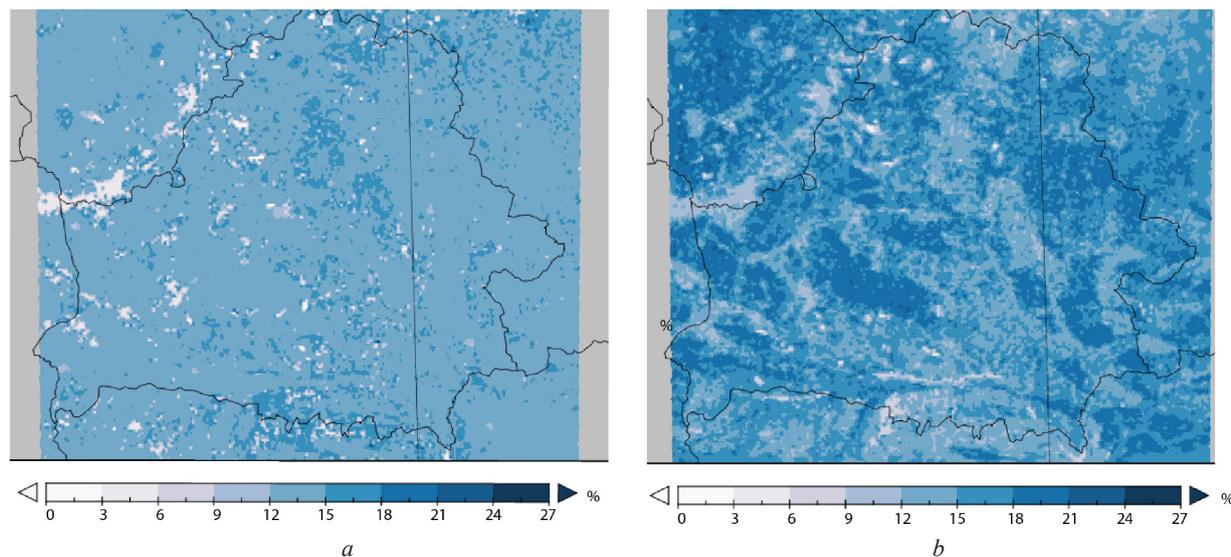


Рис. 2. Пространственные распределения альbedo подстилающей поверхности: *a* – оригинальная база данных WRF; *b* – композитный оперативный спутниковый продукт

Fig. 2. Maps of the spatial distribution of the surface albedo: *a* – original WRF database; *b* – composite operational satellite product

Результаты численных экспериментов показали, что использование одной и той же численной модели атмосферы при различных способах задания пространственной структуры землепользования и физических параметров подстилающей поверхности может приводить к существенным различиям в численных прогнозах радиационных, термических и конвективных процессов в пограничном слое атмосферы. Использование в модели WRF данных о землепользовании высокого пространственного разрешения и учет в ней временной изменчивости альbedo, LAI и FPAR позволили существенно уточнить распределение турбулентных потоков скрытого и явного тепла с подстилающей поверхности и сократить ошибку численного прогноза приземной температуры для зимнего периода при всех сроках прогнозирования (рис. 3). Наибольшее сокращение ошибок прогноза температуры наблюдается для дневного времени суток (сроки +12 и +36 ч),

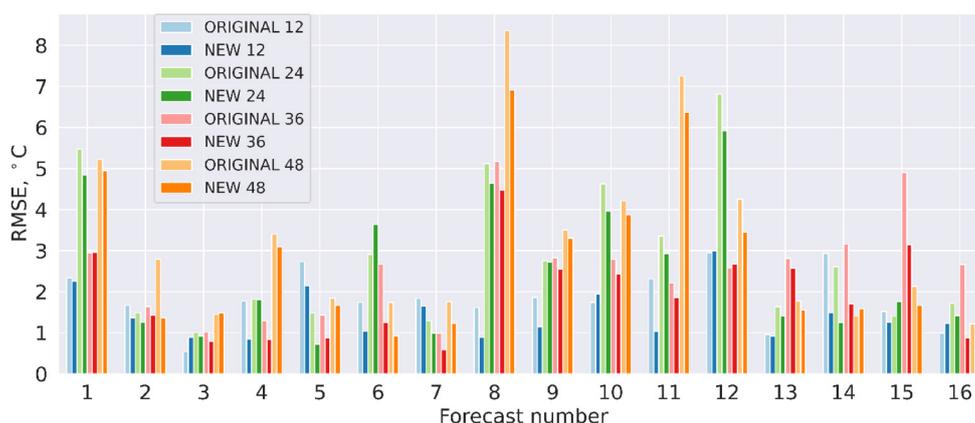


Рис. 3. Среднеквадратическая погрешность (RMSE) численного прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси с заблаговременностью +12, +24, +36 и +48 ч для нескольких промоделированных метеорологических ситуаций: ORIGINAL и NEW – прогнозы на основе модели WRF со стандартным и актуализированным комплектами данных о подстилающей поверхности соответственно

Fig. 3. Root-mean-square error (RMSE) of the numerical forecast of surface air temperature on the territory of Belarus with a lead time of +12, +24, +36 and +48 h for several simulated meteorological situations: ORIGINAL and NEW are forecasts based on the WRF model with standard and updated land surface datasets respectively

что, вероятно, связано с более активным проявлением в дневные часы положительных обратных связей между альбедо и температурой подстилающей поверхности в зимние месяцы. Повышение точности прогноза температуры более отчетливо проявляется для поздних сроков (+36 и +48 ч), что объясняется быстрым «затуханием» влияния начального состояния атмосферы и слабо изменяющимся со временем влиянием граничных условий на результаты моделирования эволюции атмосферных процессов.

Достаточно показательный пример, демонстрирующий важность корректного учета структуры землепользования и физических параметров подстилающей поверхности при численных прогнозах погоды, представлен на рис. 4. Карты численного прогноза температуры воздуха на высоте 2 м, полученные при двух используемых цифровых моделях подстилающей поверхности (ORIGINAL – стандартная для WRF, NEW – актуализированная на основе данных GLC2019 и GLASS), демонстрируют существенные различия. Видно, что обновление цифровой модели подстилающей поверхности позволило уточнить фронтальные разделы на карте приземной температуры и обеспечило лучшее соответствие результатов численного моделирования данным метеорологических наблюдений. Среднеквадратическая погрешность прогноза температуры воздуха для дневных сроков +12 и +36 ч уменьшилась (в сравнении с прогнозом ORIGINAL) на 0,61 и 1,76 °C соответственно.

В рамках численных экспериментов было установлено, что среди изменяемых в модели WRF характеристик подстилающей поверхности наибольшее влияние на результаты численного прогноза температуры оказывает альбедо, роль которого особенно велика в зимние месяцы. В летние месяцы пространственная, и тем более временная изменчивость альбедо значительно меньше, поэтому для корректного учета его изменчивости в модели требуется достаточно высокая точность спутниковых измерений.

Как известно, альбедо подстилающей поверхности напрямую из космоса не измеряется, а рассчитывается по разновременным измерениям спектральных коэффициентов яркости на верхней границе атмосферы в рамках выбранной модели индикатрисы отражения поверхности [10]. Несоответствие этой модели реальным условиям обуславливает возникновение систематической ошибки в определении альбедо. В связи с этим авторами были проведены дополнительные численные эксперименты по прогнозированию метеорологических условий в Беларуси в летний период при различных коэффициентах коррекции альбедо. Расчеты выполнены при четырех значениях

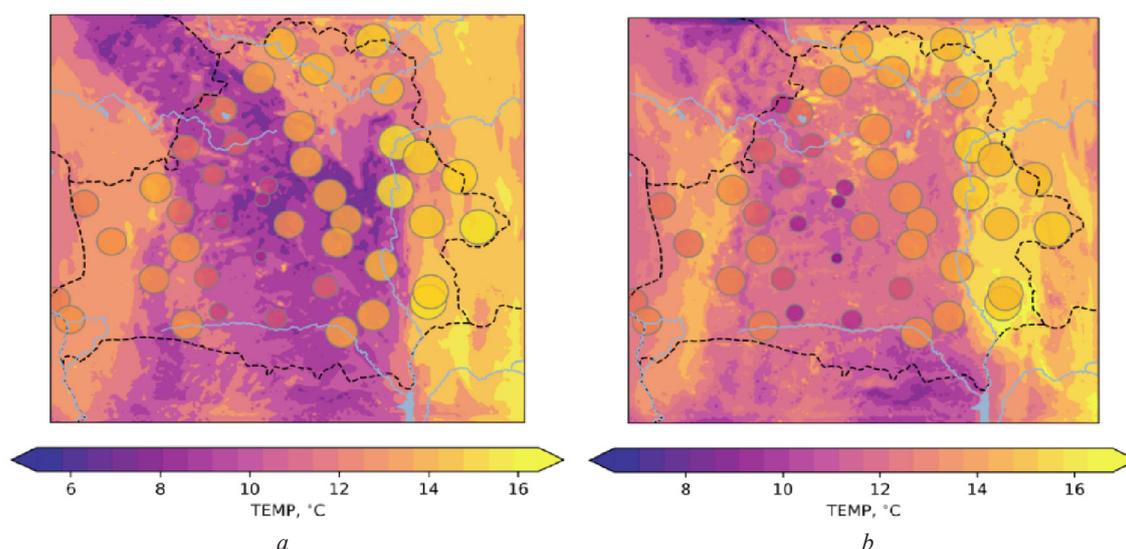


Рис. 4. Численный прогноз температуры воздуха с использованием в модели WRF оригинальных (а) и обновленных (б) геофизических данных. Окружностями разного диаметра и цвета показаны значения температуры на метеорологических станциях

Fig. 4. Numerical forecast of air temperature using the original (a) and updated (b) geophysical datasets in the WRF model. Circles of different diameters and colors show the temperature values at meteorological stations

поправочного коэффициента: 1,0 (сценарий `albedo_100` без коррекции альbedo), 0,25 (`albedo_25`), 0,5 (`albedo_50`) и 0,75 (`albedo_75`). Значения LAI и FPAR для исследуемого региона во всех экспериментах брались из обновленной базы данных для модели WRF. Дополнительно проводились расчеты с альbedo из оригинальной базы данных WRF (сценарий `original`), а также варианта с использованием стандартных значений альbedo, но с актуализированными среднемесячными значениями LAI и FPAR (сценарий `albedo_no`). В общей сложности было промоделировано более 60 дней с различными вариантами задания альbedo.

Анализ результатов эксперимента показал, что наименьшая среднеквадратическая погрешность прогноза приземной температуры достигается при поправочном коэффициенте для альbedo 0,25, что соответствует занижению значений альbedo, получаемого по данным MODIS, в 4 раза. В этом случае среднеквадратическая погрешность прогноза температуры на метеорологических станциях Беларуси для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч уменьшается в среднем на 0,30, 0,10, 0,15 и 0,16 °C соответственно по отношению к прогнозу без корректировки альbedo (рис. 5).

Таким образом, наиболее перспективным для оперативных систем мезомасштабного прогнозирования погоды на территории Беларуси для летнего периода представляется подход, предполагающий ежедневную актуализацию геофизических характеристик подстилающей поверхности на основе оперативных спутниковых продуктов с коррекцией альbedo. При использовании в модели WRF оперативных данных ДЗЗ с коррекцией альbedo средняя и систематическая ошибки прогноза приземной температуры воздуха сокращаются как по отношению к оригинальному варианту модели WRF, так и по отношению к результатам прогноза с использованием обновленных среднемесячных геофизических данных.

Обе схемы обновления геофизических данных в модели WRF приводят к уменьшению среднеквадратической ошибки прогноза температуры для всех заблаговременностей. Для дневных сроков средняя абсолютная и среднеквадратическая ошибки прогноза температуры с использованием среднемесячных геофизических данных меньше, чем с использованием оперативных спутниковых продуктов. Для ночных сроков ситуация обратная. Наименее успешные результаты численного прогноза температуры при всех заблаговременностях соответствуют оригинальному для модели WRF набору геофизических данных.

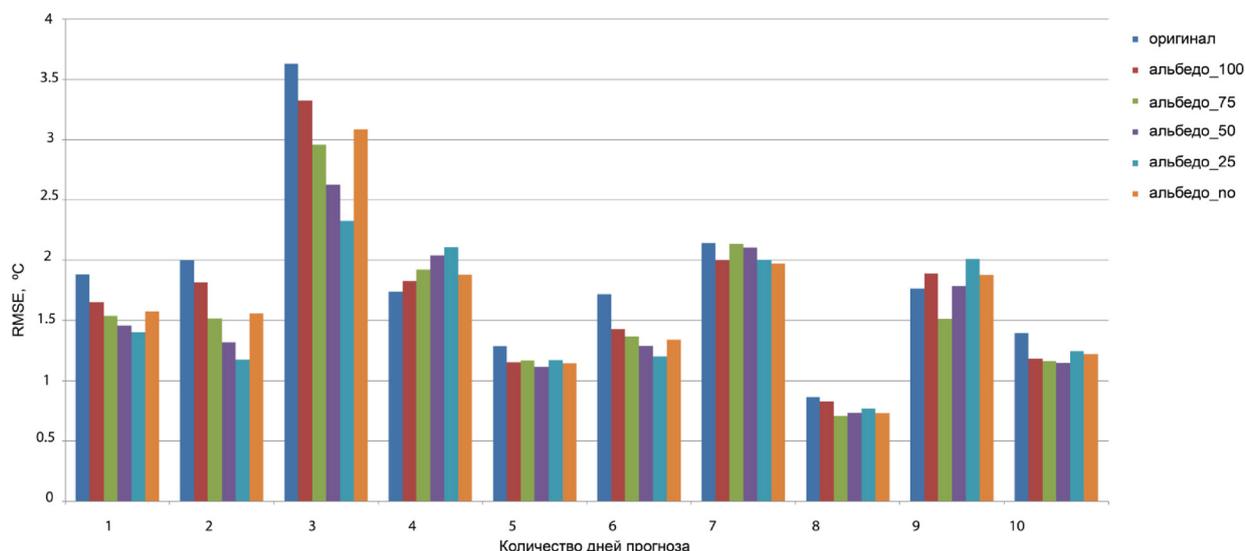


Рис. 5. Среднеквадратическая погрешность (RMSE) численного прогноза приземной температуры воздуха на территории Беларуси с заблаговременностью +12, +24, +36 и +48 ч для нескольких промоделированных летних метеорологических ситуаций с различными поправочными коэффициентами для альbedo (альbedo\_100, альbedo\_75, альbedo\_50, альbedo\_25, альbedo\_no)

Fig. 5. Root mean square error (RMSE) of numerical forecast of surface air temperature on the territory of Belarus with a lead time of +12, +24, +36 and +48 h for several simulated summer meteorological situations with different albedo coefficients (albedo\_100, albedo\_75, albedo\_50, albedo\_25, albedo\_no)

**Заклучение.** Авторами рассмотрены различные схемы актуализации характеристик подстилающей поверхности в мезомасштабной системе численного прогноза погоды WRF, применяемой в национальной гидрометеорологической службе, на основе среднемесячных и оперативных продуктов ДЗЗ (альbedo, листовой индекс, доля поглощаемой растительностью фотосинтетически активной радиации).

Сопоставление численных прогнозов приземной температуры с данными метеорологических наблюдений показало, что модель WRF с актуализированными наборами среднемесячных данных о подстилающей поверхности обеспечивает более качественный прогноз, особенно для сроков +12 и +36 ч (дневные часы). Уменьшение среднеквадратической погрешности прогноза приземной температуры при сроках +12, +24, +36 и +48 ч достигает 1,5, 1,3, 2,1 и 1,4 °C соответственно. В среднем для рассмотренных случаев уменьшение среднеквадратической погрешности прогноза температуры при указанных сроках составило 0,40, 0,35, 0,68 и 0,56 °C соответственно.

Для летнего периода на основе численных экспериментов был установлен оптимальный коэффициент коррекции альbedo 0,25 подстилающей поверхности, использование которого при моделировании погоды в Беларуси позволяет сократить среднеквадратическую погрешность прогноза температуры для заблаговременности +12, +24, +36 и +48 ч в среднем на 0,30, 0,10, 0,15 и 0,16 °C соответственно.

Дальнейшее повышение точности численных прогнозов погоды на территории Беларуси, по мнению авторов, возможно за счет большей детализации в описании подстилающей поверхности за пределами Беларуси, а также за счет ассимиляции в численных моделях прогноза погоды доступных наземных и спутниковых данных об атмосфере, включая профили скорости ветра, температуры и влажности. Перспективным также представляется использование для корректировки численных прогнозов погоды методов машинного обучения. К настоящему времени накоплен достаточно большой статистический материал об ошибках численных прогнозов метеорологических величин на станциях Беларуси, который может быть обобщен методами искусственного интеллекта и учтен при финальной обработке численных прогнозов погоды. Все это будет являться предметом дальнейших исследований авторов.

### Список использованных источников

1. Evaluating the use of Aeolus satellite observations in the regional numerical weather prediction (NWP) model Harmonie-Arome / S. Hagelin [et al.] // *Atmos. Meas. Tech.* – 2021. – Vol. 14, N 9. – P. 5925–5938. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5925-2021>
2. Effect of the ingestion in the WRF model of different Sentinel-derived and GNSS-derived products: analysis of the forecasts of a high impact weather event / M. Lagasio [et al.] // *Eur. J. Remote Sens.* – 2019. – Vol. 52, N 4. – P. 16–33. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1642799>
3. Integrating remote sensing data with WRF model for improved 2-m temperature and humidity simulations in China / D. Yan [et al.] // *Dynam. Atmos. Oceans.* – 2020. – Vol. 89. – Art. 101127. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2019.101127>
4. Sensitivity of the Weather Research and Forecast/Community Multiscale Air Quality modeling system to MODIS LAI, FPAR, and albedo / L. Ran [et al.] // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2015. – Vol. 120, N 16. – P. 8491–8511. <https://doi.org/10.1002/2015jd023424>
5. A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model / H. Li [et al.] // *Atmosphere.* – 2020. – Vol. 11, N 4. – P. 350. <https://doi.org/10.3390/atmos11040350>
6. Knist, S. Effects of land surface inhomogeneity on convection-permitting WRF simulations over central Europe / S. Knist, K. Goergen, C. Simmer // *Meteorol. Atmos. Phys.* – 2020. – Vol. 132, N 1. – P. 53–69. <https://doi.org/10.1007/s00703-019-00671-y>
7. Impact of refined land surface properties on the simulation of a heavy convective rainfall process in the Pearl River Delta region, China / M. Chang [et al.] // *APJAS.* – 2014. – Vol. 50, N 1. – P. 645–655. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0052-3>
8. A description of the Advanced Research WRF Model Version 4 / W. C. Skamarock [et al.] // *NCAR Techn. Boulder: National Center for Atmospheric Research.* – 2021. – 165 p.
9. Global Forecast System (GFS) [Rules for the citing sources] [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>. – Date of access: 01.05.2022.
10. Schaaf, C. MCD43A3: MODIS/Terra and Aqua BRDF/Albedo Daily L3 Global 500 m V006 [Data Set] / C. Schaaf, Z. Wang; NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. – Sioux Falls, SD, USA, 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43A1.006>

## References

1. Hagelin S., Azad R., Lindskog M., Schyberg H., Körnich H. Evaluating the use of Aeolus satellite observations in the regional numerical weather prediction (NWP) model Harmonie–Arome. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, vol. 14, no. 9, pp. 5925–5938. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5925-2021>
2. Lagasio M., Pulvirenti L., Parodi A., Boni G., Pierdicca N., Venuti G., Realini E., Tagliaferro G., Barindelli S., Rommen B. Effect of the ingestion in the WRF model of different Sentinel-derived and GNSS-derived products: analysis of the forecasts of a high impact weather event. *European Journal of Remote Sensing*, 2019, vol. 52, no. 4, pp. 16–33. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1642799>
3. Yan D., Liu T., Dong W., Liao X., Luo S., Wu K., Zhu X., Zheng Zh., Wen X. Integrating remote sensing data with WRF model for improved 2-m temperature and humidity simulations in China. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2020, vol. 89, art. 101127. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2019.101127>
4. Ran L., Gilliam R., Binkowski F. S., Xiu A., Pleim J., Band L. Sensitivity of the Weather Research and Forecast/Community Multiscale Air Quality modeling system to MODIS LAI, FPAR, and albedo. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, vol. 120, no. 16, pp. 8491–8511. <https://doi.org/10.1002/2015jd023424>
5. Li H., Zhang H., Mamtimin A., Fan S., Ju C. A New Land-Use Dataset for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 350. <https://doi.org/10.3390/atmos11040350>
6. Knist S., Goergen K., Simmer C. Effects of land surface inhomogeneity on convection-permitting WRF simulations over central Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2020, vol. 132, no. 1, pp. 53–69. <https://doi.org/10.1007/s00703-019-00671-y>
7. Chang M., Fan S., Fan Q., Chen W., Zhang Y., Wang Y., Wang X. Impact of refined land surface properties on the simulation of a heavy convective rainfall process in the Pearl River Delta region, China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 645–655. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0052-3>
8. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D. M., Huang X.-Y. *A description of the Advanced Research WRF Model Version 4*. Boulder, Colorado, National Center for Atmospheric Research, 2019. 165 p.
9. *Global Forecast System (GFS)* [Rules for the citing sources]. Available at: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs> (accessed 01.05.2022).
10. Schaaf C., Wang Z. *MCD43A3: MODIS/Terra and Aqua BRDF/Albedo Daily L3 Global 500 m V006 [Data Set]*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center: Sioux Falls, SD, USA, 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43A1.006>

## Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, директор. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [lysenko.nature@gmail.com](mailto:lysenko.nature@gmail.com).

Зайко Полина Олеговна – науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [nature@ecology.basnet.by](mailto:nature@ecology.basnet.by).

## Information about the authors

Lysenko Sergey A. – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [lysenko.nature@gmail.com](mailto:lysenko.nature@gmail.com).

Zaiko Polina O. – Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [nature@ecology.basnet.by](mailto:nature@ecology.basnet.by).